Journal of Agroecology
Homepage: http://agry.um.ac.ir

Research Article
Vol. 17, No. 4, 2026, p. 575-590

Morphophysiological and Growth Responses of Sesame (*Sesamum indicum* L.) Plant to Combined Use of Biochar and Chemical Fertilizer

Sajjad Toorany[1], Masoumeh Naeemi[1]*, Abbas Biabani[1] and Ali Nakhzari Moghaddam[1]

1- Department of Plant Production, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Gonbad Kavous, Gonbad Kavous, Iran
(*- Corresponding author's Email: Naeemi_701@yahoo.com)

Received: 12-08-2025 Revised: 01-12-2025 Accepted: 06-12-2025 Available Online: 10-05-2026	**How to cite this article:** Toorany, S., Naeemi, M., Biabani, A., & Nakhzari Moghaddam, A. (2026). Morphophysiological and growth responses of sesame (*Sesamum indicum* L.) plant to combined use of Biochar and chemical fertilizer. *Journal of Agroecology, 17*(4), 575-590. (In Persian with English abstract) https://doi.org/10.22067AGRY.2025.94894.1249

Introduction

Sesame (*Sesamum indicum* L.) is a key oilseed crop, prized for its high-quality oil and protein content, making it vital to both agriculture and the economy. As global population growth drives up demand for vegetable oils, sesame production has become increasingly significant in Iran and worldwide. However, the heavy reliance on chemical fertilizers to enhance yields has caused environmental challenges, including soil degradation, reduced fertility, and water pollution. Biochar, a stable organic material produced by the thermal decomposition of plant biomass, offers a sustainable alternative by improving the soil's physical and chemical properties, enhancing water retention, and reducing nutrient loss. Combining biochar with chemical fertilizers can decrease dependency on chemical inputs while boosting crop performance, supporting sustainable farming practices. This study evaluated the effects of integrated biochar and chemical fertilizer application on sesame's morphophysiological and agronomic traits, aiming to develop a practical strategy for improving its productivity.

Materials and Methods

This study was conducted during the 2020-2021 cropping season as a factorial experiment in a randomized complete block design with three replications in a field located in Aliabad-e Katul, Golestan Province, Iran. The experiment evaluated five biochar levels (0, 2, 4, 8, and 10 by weight, denoted as B_0, B_2, B_4, B_8 and B_{10}) and three chemical fertilizer levels (0, 50%, and 100% of crop requirement, denoted as F_0, $F_{50\%}$, and $F_{100\%}$). Soil samples from a 0-30 cm depth were analyzed for physicochemical properties before land preparation, which involved ploughing, disking, and levelling. Nitrogen, phosphorus, and potassium fertilizers were applied based on soil test results, with urea, triple superphosphate, and potassium sulfate as sources. The cultivar Oltan was planted manually on June 15, 2020, in 4×5 m plots. Irrigation occurred weekly, and weed, pest, and disease control were maintained. Harvesting took place on October 12, 2020, with traits such as plant height, number of

https://doi.org/10.22067AGRY.2025.94894.1249

lateral branches, number of capsules per plant, number of seeds per capsule, 1000-seed weight, seed yield, biological yield, harvest index, Oil percentage, Oil yield and chlorophyll content (a, b, and total) measured. Chlorophyll was quantified using spectrophotometry at 663, 646, and 470 nm wavelengths.

Results and Discussion

The results indicated that all examined traits were significantly influenced by the main effects of biochar and chemical fertilizer. The interaction effect was significant only for the number of capsules per plant. The highest plant height (102.57 cm), number of lateral branches (4.03), number of capsules per plant (54.11), thousand seed weight (2.97 g), seed yield (1267.4 $kg.ha^{-1}$), biological yield (5418.3 $kg.ha^{-1}$), harvest index (22.03%), Oil yield (625.22 $kg.ha^{-1}$) and chlorophyll a (1.62 $mg.g^{-1}$ fresh weight) were obtained from the treatment with B_8 biochar and $F_{100\%}$ chemical fertilizer. The highest number of seeds per capsule (70.59) was recorded in the B_{10} biochar treatment. The highest levels of chlorophyll b and total chlorophyll were observed in the B_4 biochar treatment, with 1.15 and 2.75 $mg.g^{-1}$ fresh weight, respectively. The control treatment recorded the highest oil percentage of 52.82%. Biochar improved soil water and nutrient retention and enhanced the uptake of nutrients such as nitrogen and magnesium, while chemical fertilizers provided direct access to nutrients and promoted growth. These results are consistent with previous research that emphasizes biochar's role in increasing crop yield and quality. The synergy between biochar's soil-improving effects (such as increased cation exchange capacity) and the nutrient supply from chemical fertilizers significantly enhanced sesame performance. Since the highest seed yield was obtained at the highest fertilizer level used, further research is recommended to determine the optimal fertilizer level.

Conclusion

The use of biochar and chemical fertilizers markedly enhanced sesame's morphophysiological and agronomic responses. Biochar improved soil conditions and minimized nutrient leaching, while chemical fertilizers supplied essential nutrients, resulting in higher seed yields and better growth metrics. This approach demonstrates potential for reducing chemical fertilizer use and advancing sustainable agriculture. Future studies should explore optimal application rates and long-term impacts.

Keywords: Chlorophyll, Harvest index, Number of capsules, Seed yield

نشریه بوم شناسی کشاورزی
Homepage: http://agry.um.ac.ir

مقاله پژوهشی

جلد ۱۷، شماره ٤، زمستان ١٤٠٤، ص ۵۹۰-۵۷۵

واکنش‌های مورفوفیزیولوژیک و رشدی گیاه کنجد (*Sesamum indicum* L.) به کاربرد تلفیقی بیوچار و کود شیمیایی

سجاد طورانی[۱]، معصومه نعیمی[۱*]، عباس بیابانی[۱] و علی نخزری مقدم[۱]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۲۱
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۱۵

چکیده

به‌منظور ارزیابی پاسخ‌های مورفوفیزیولوژیک و زراعی گیاه کنجد (*Sesamum indicum* L.) بـه اثـر تغذیـه‌ای کـاربرد تلفیقـی بیوچـار و کـود شیمیایی، آزمایشی به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار در مزرعـه‌ای در شهرسـتان علی‌آبـادکتول در سـال زراعـی ۱۴۰۰-۱۳۹۹ انجام شد. عامل‌های آزمایش عبارتند از بیوچار در پنج سطح شامل شاهد، ۲، ۴، ۸ و ۱۰ درصد وزنی؛ کود شیمیایی در سـه سـطح شـامل عدم مصرف، مصرف ۵۰ و ۱۰۰ درصد نیاز کودی گیاه در نظر گرفته شدند. صفات مورد بررسی شامل ارتفاع بوته، تعداد شاخه‌های جانبی، تعداد کپسـول در بوته، تعداد دانه در کپسول، وزن هزار دانه، عملکرد دانه، عملکرد بیولوژیک، شاخص برداشت، درصد روغن، عملکرد روغن، کلروفیل a، کلروفیـل b و کلروفیل کل بود. نتایج نشان داد که همه صفات مورد بررسی به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر اثرات اصلی بیوچار و کود شیمیایی قرار گرفتند. اثـر متقابـل بیوچار و کود شیمیایی بر صفت تعداد کپسول در بوته معنی‌داری شد. بیش‌ترین ارتفاع بوته (۱۰۲/۵۷ سانتی‌متر)، تعداد شـاخه‌های جـانبی (۴/۰۳ عـدد)، تعداد کپسول در بوته (۵۴/۱۱ عدد)، وزن هزار دانه (۲/۹۷ گرم)، عملکرد دانه (۱۲۶۷/۴ کیلوگرم در هکتـار)، عملکـرد بیولوژیـک (۵۴۱۸/۳ کیلـوگرم در هکتار)، شاخص برداشت (۲۲/۰۳ درصد)، عملکرد روغن (۶۲۵ /۲۲ کیلوگرم در هکتار) و کلروفیل a (۱/۶۲ میلی‌گرم بر گرم وزن‌تر) از تیمـار مصـرف ۸ درصد وزنی بیوچار و ۱۰۰ درصد کود شیمیایی در کنجد به دست آمد. بیش‌ترین تعداد دانه در کپسول (۷۰/۵۹) متعلق به تیمار کاربرد ۱۰ درصـد وزنـی بیوچار بود. همچنین بیش‌ترین مقدار کلروفیل b و کلروفیل کل در تیمار ۴ درصد وزنی بیوچار به‌ترتیب با ۱/۱۵ و ۲/۷۵ میلی‌گرم بر گرم وزن‌تر مشاهده شد. شاهد نیز بیش‌ترین درصد روغن (۵۲/۸۲ درصد) را به خود اختصاص داد، درحالی‌که تیمار ۸ درصد وزنـی بیوچـار کم‌تـرین میـزان (۴۹/۵۱ درصـد) صفات مذکور را داشت.

واژه‌های کلیدی: تعداد کپسول، شاخص برداشت، عملکرد دانه، کلروفیل

مقدمه

زراعت دانه‌های روغنی در جهان با توجـه بـه افـزایش جمعیـت، توسعه شهرنشینی و بالا رفتن مصـرف سـرانه روغـن نبـاتی، توسـعه چشم‌گیری داشته اسـت و کشـورهای اروپـایی، کانـادا و اسـترالیا بـا پرداخت یارانه‌های هنگفت به کشاورزان می‌کوشند تا بازارهای جهانی را تسخیر کنند. در ایران نیز افزایش جمعیت، افزایش مصـرف سـرانه روغن و تغییر ذائقه مردم، زمینه وابستگی شدید کشور به واردات روغن را فـراهم آورده اسـت (Zareei Siahbidi & Rezaizad, 2015). کنجد (*Sesamum indicum* L.) یکی از مهم‌تـرین و قـدیمی‌تـرین دانه‌های روغنی است که از لحاظ اقتصادی از اهمیت زیادی برخوردار بوده و به‌طور گسترده در سراسر جهان کشت و توزیع می‌شود. کنجـد گیاهی یک ساله و خودگشن از خـانواده Pedaliaceae اسـت. طـول دوره رشد گیاه کنجد بسته به شرایط آب‌وهوایی ۷۰ تا ۱۵۰ روز اسـت (Amna et al., 2022). دانه کنجد بسته به شرایط و نوع رقـم دارای

۱- گروه تولیدات گیاهی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه گنبد کـاووس، گنبد کاووس، ایران

(*- نویسنده مسئول: Email: Naeemi_701@yahoo.com)

https://doi.org/10.22067AGRY.2025.94894.12

۴۰ تا ۶۰ درصد روغن و ۱۷ تا ۲۹ درصد پروتئین است که روغـن آن به‌دلیل ترکیب فنلی با خاصیت آنتی‌اکسیدانی بـه‌نام سـزامول از دوام خـوبی برخـوردار اسـت (Ahmed et al., 2023). کنجـد گیـاهی گرمادوست و سازگار با نواحی خشک و نیمه‌خشک است که طی دوره رشد، نیاز به هوای آفتابی و صـاف دارد. سـطح زیرکشـت و میـانگین عملکرد جهانی کنجد در سال ۲۰۲۳ به‌ترتیب حدود ۱۲ تا ۱۳ میلیـون هکتار و در حدود ۵۰۰ تا ۶۰۰ کیلوگرم در هکتار گزارش شـده اسـت (FAOSTAT, 2023). در سال زراعی ۱۴۰۳-۱۴۰۲، این محصـول در ایران در سطحی معادل حدود ۵۰ تا ۶۵ هزار هکتـار و بـا میـانگین عملکرد حدود ۷۰۰ تا ۱۱۰۰ کیلـوگرم در هکتـار کشـت شـده اسـت (Anonymous, 2023).

در گیاهان کودهای شیمیایی در تمام دوره‌های رشدونمو مورد نیاز می‌باشند. اگرچه مصرف طولانی‌مدت کودهای شیمیایی سبب افزایش فوری عملکـرد محصـولات مـی‌شـود، امّـا در بلندمـدت باعـث بـروز مشکلاتی مانند افت کیفیت فیزیکی و شیمیایی خـاک، کـاهش مـاده آلی و تضعیف فعالیت زیستی خاک می‌گردد. اسـتفاده بـیش از حـد این کودها موجب انباشت امـلاح، تخریـب سـاختمان خـاک، کـاهش تخلخل، کاهش ظرفیت نگهداشت آب، افزایش خطـر آلـودگی منـابع طبیعـی و سـلامت انسـان می‌شـود (Daneshmandi & Seyyedi, 2019). در مقابل، تلفیق کودهای آلی با مدیریت پایدار زراعی می‌تواند این اثرات منفی را کاهش داده و محیط مناسب‌تری برای رشـد گیـاه فراهم کند. یکی از مؤثرترین مواد اصـلاح‌کننده، بیوچـار اسـت کـه از سوزاندن بقایای گیاهی و ضایعات کشـاورزی در حضـور مقـادیر کـم اکسیژن و یا عدم حضور آن تولید می‌شـود. بیوچـار بـا تثبیـت کـربن، افزایش تخلخل خاک، بهبود ظرفیت تبادل کاتیونی و کاهش شـوری، نقش مهمی در بهبود سلامت و بهره‌وری خاک‌های فقیر دارد (Abd El-Mageed et al., 2021). به‌کارگیری بیوچار به‌ویژه در خاک‌هـای مناطق خشک و نیمه‌خشک، علاوه‌بر بهبود خصوصیات فیزیکی خاک باعث افزایش دسترسی گیاهان بـه عناصـر غـذایی و ارتقـاء عملکـرد محصولات کشاورزی شده و می‌تواند اثرات منفی مصرف بیش از حـد کودهای شیمیایی را تا حد زیادی جبران کند (Abbas et al., 2017).

نتایج تحقیقات نشان داده است که استفاده از بیوچار باعث بهبـود کیفیت خاک از طریق بهبود خواص فیزیکوشیمیایی و بیولـوژیکی آن می‌شود که در نتیجه باعث افزایش تولید محصول می‌گـردد. علاوه‌بـر این، بیوچار می‌تواند اسیدیته، قلیائیت و شوری خـاک را کنتـرل کنـد. همچنین بیوچار به‌وسیله حفظ کربن آلی و رطوبت خـاک، در اصـلاح خاک‌های ضعیف نقش مهمی ایفا و در نتیجه به بـالا رفـتن عملکـرد محصول کمـک می‌کنـد (Palansooriya et al., 2019). در شـرایط تنش خشکی، کاربرد بیوچار سبب افـزایش رشـد گیـاه، زیسـت‌تـوده، رنگدانه‌های فتوسنتزی، عملکرد و کیفیت می‌شـود (Rizwan et al., 2016). نتایج تحقیقات نشان داد که کاربرد ۱۰ تن در هکتـار بیوچـار پوسته برنج (*Oryza sativa* L.) به‌طور قابـل تـوجهی عملکـرد دانـه کنجد را به‌میزان ۵۵/۵ درصـد در مقایسـه بـا شـاهد، بـه‌دلیل بهبـود خـواص فیزیکوشـیمیایی خـاک از جملـه وزن مخصـوص حقیقـی و ظاهری، افزایش pH، نیتروژن کل، پتاسیم، منیزیم و ظرفیـت تبـادل کاتیون افـزایش داد (Ndor et al., 2015). در مطالعـه‌ای بـا بررسـی کاربرد بیوچار کود گاوی بر رشد و عملکرد گیاه سویا (*Glycine max* L.) تحت تنش کم‌آبی در یک خاک رسـی سـیلتی گـزارش شـد کـه مصرف بیوچار به‌میزان ۱/۲۵ درصد سبب افزایش رشد و عملکرد گیاه شده و با بهبود وضعیت نگهداری آب خاک، اثرات تنش کـم آبـی بـر رشد گیاه را کاهش داد (Gavili et al., 2016).

اگرچه کنجد به‌عنوان گیاهی با نیاز کـودی پـایین شـناخته شـده است، امّا فراهمی عناصر غذایی بر عملکرد دانه آن اثـر مسـتقیم دارد. در بررسی تأثیر نیتروژن روی کنجـد ملاحظـه شـد کـه کـاربرد ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن منجر به افزایش عملکرد دانه و روغن شده است (Haghanian et al., 2016). بـه‌کار بـردن مقـادیر متعـادلی از بیوچار به‌همراه کود شیمیایی به‌سبب بهبـود عناصـر غـذایی خـاک و کاهش آبشویی، علاوه‌بر تأثیر بهینه بر عملکرد، میزان آب مصـرفی را کاهش می‌دهد، به‌طوری‌که کاربرد ۱۰ تن در هکتار بیوچـار بـه‌همراه مصرف کود شیمیایی، عملکرد دانه و عملکرد بیولوژیک گیـاه دارویـی سـیاهدانه (*Nigella sativa* L.) را در شـرایط آبیـاری براسـاس ۷۰ درصد نیاز آبی گیاه نسبت به شاهد افزایش داد (Abbaspour et al., 2017). در بررسـی تـأثیر بیوچـار، کمپوسـت و کـود شـیمیایی بـر عملکـرد و اجـزای عملکـرد گنـدم (*Triticum aestivum* L.)، بیش‌ترین تـأثیر بیوچـار را در کـاربرد آن بـه‌همـراه کـود شـیمیایی و کمپوست عنـوان کردنـد (Gebremedhin et al., 2015). تیمارهای حاوی ترکیب کود شـیمیایی و بیوچـار بـه‌دلیل جلـوگیری از آبشـویی عناصر توسط بیوچار نسبت به تیمارهای کود شـیمیایی بـدون بیوچـار تأثیر مثبت روی عملکـرد گیـاه داشـتند (Chaudhry et al., 2016). همچنین گزارش شده است که افزودن بیوچـار تولیـدی از علـف‌هـرز

Eupatorium adenophorum L. در ترکیب با NPK بـا تـأثیر بـر زیست‌توده ذرت، علاوه‌بر نگهداری عناصر غذایی سبب افزایش رشـد و عملکرد گیاه ذرت شد (Pandit et al., 2018).

در حال حاضر، اطلاعات کمی در مورد تأثیر بیوچار بر گیاه کنجـد وجود دارد که بیانگر نیاز به درک این موضوع است که چگونه افزودن بیوچار می‌تواند به‌طور مؤثر در جهت افزایش عملکرد کنجد به‌کار رود. لذا هدف از اجرای این مطالعه، ارزیابی پاسخ‌های مورفوفیزیولوژیکی و زراعی گیاه کنجد به اثر تغذیه‌ای کاربرد تلفیقی بیوچار و کود شیمیایی بود.

مواد و روش‌ها

این آزمایش در سال زراعی ۱۴۰۰-۱۳۹۹ به‌صورت فاکتوریـل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی بـا سـه تکـرار، در مزرعـه‌ای در شهرستان علی‌آبادکتول با میـانگین درازمـدت بارنـدگی سـالانه ۷۳۱ میلی‌متر و حداقل و حداکثر دمـای سـالانه بـه‌ترتیب ۱۲ و ۲۳ درجـه سانتی‌گراد و اقلیم کوهپایه‌ای اجرا گردیـد. ارتفـاع ایـن شهرسـتان از سطح دریا ۱۸۴ متر بوده و در ۵۴ درجه و ۵۳ دقیقه طول جغرافیایی و ۳۶ درجه و ۵۲ دقیقه عرض جغرافیایی اسـتان گلسـتان واقـع اسـت. تیمارهای آزمایشی شامل پنج سطح مختلف بیوچـار صـفر، ۲، ۴، ۸ و ۱۰ درصد وزنی (بـه‌ترتیب B_0، B_2، B_4، B_8 و B_{10}) و در سـه سـطح کود شیمیایی شامل عدم مصرف کود، مصرف ۵۰ و ۱۰۰ درصـد نیـاز کودی گیاه (به‌ترتیب F_0 ، $F_{50\%}$ و $F_{100\%}$) مورد بررسی قرار گرفت. بـا توجه به اینکـه تیمـار کـود شـیمیایی در انجـام تحقیـق مـورد توجـه می‌باشد، برای ارزیابی خصوصیات شیمیایی و فیزیکی خـاک، قبـل از انجــام عملیــات آماده‌ســازی زمــین، نمونــه‌برداری از عمــق ۳۰-۰ سانتی‌متری خاک مورد نظر انجام گردید (جدول ۱).

جدول ۱- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک محل اجرای آزمایش
Table 1- Physical and chemical properties of the soil at the experiment site

بافت Texture	ماسه Sand (%)	سیلت Silt (%)	رس Clay (%)	پتاسیم قابل جذب Absorbable K ($mg.kg^{-1}$)	فسفر قابل جذب Absorbable P ($mg.kg^{-1}$)	نیتروژن کل Total N (%)	کربن آلی Organic C (%)	اسیدیته pH	هدایت الکتریکیEC ($dS.m^{-1}$)	درصد اشباع Saturation) (percentage
Si-C-L	16	54	30	125	4.5	0.11	1.1	7.69	1.37	57.29

به‌منظور آماده‌سازی، ابتـدا زمـین مـورد نظر به کمـک گـاوآهن شخم زده و سپس کلوخه‌ها با دو مرتبه دیسک عمود بـر هم نرم شد و تسطیح به کمک لولر انجام گرفت. با توجه به نتـایج آزمـون خـاک مزرعه مورد مطالعه، برای حصول عملکرد مطلوب کنجد توصیه گردید که مقدار ۶۵ کیلوگرم در هکتـار کـود سوپرفسـفات تریپـل در زمـان کاشت به‌عنوان منبع فسفر مصرف شود. همچنین جهـت تـأمین نیـاز نیتروژنی گیاه، مقدار ۱۲۵ کیلوگرم در هکتار کود اوره به‌صـورت یـک سوم هنگام کاشت و دوسوم در مرحله ۶ تا ۸ برگـی اسـتفاده گردیـد. علاوه‌بـر ایـن بـه‌منظور بهبـود وضـعیت پتاسیم خـاک، مصـرف ۹۰ کیلوگرم در هکتار کود پتاسیم سولفات به‌صورت پایـه بـه زمـین داده شد. در این تحقیق، از رقم اولتان از بخش دانـه‌های روغنـی مؤسسـه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر تهیه گردید، همچنین بیوچار مورد نیاز از شرکت صنعت کربن فعال بشل تهیه شد. ابعاد هـر کـرت ۴×۵ متر، فاصله بین کرت‌ها ۵۰ سانتی‌متر و فاصله بین تکرارها نیز دو متر در نظر گرفته شد. عملیات کاشت در تاریخ ۲۵ خرداد ماه سـال ۱۴۰۰ به‌صورت دستی انجام گردید. فاصله بین گیاهان روی هـر ردیـف ۱۰ سانتی‌متر و بین هر ردیف ۵۰ سانتی‌متر در نظـر گرفتـه شـد. آبیـاری به‌صورت منظم و هر هفت روز یک بار و همچنین مبارزه با علف‌های هرز، آفـات و بیماری‌هـا در طـول انجـام آزمـایش صـورت پـذیرفت. برداشت بوته‌ها در تاریخ ۲۰ مهرماه سال ۱۴۰۰ انجـام گرفـت. بـرای کاهش اثر حاشیه‌ای از قسمت میانی هـر کـرت نمونـه‌برداری انجـام گردید. سپس صفات ارتفاع بوته، اجزای عملکرد دانـه از قبیـل تعـداد شاخه‌های فرعی در هر بوته، تعداد کپسول در هر بوته، تعـداد دانـه در هر کپسول، وزن هزار دانه، عملکرد بیولوژیـک گیـاه، عملکـرد دانـه، شاخص برداشت، درصد روغن و عملکرد روغن محاسبه شد.

برای محاسبه عملکرد دانه و عملکرد بیولوژیک، نمونـه‌ها در آون

با دمای ۷۵ درجه سانتی‌گراد قرار گرفت تا رطوبت به صفر برسد، پس از آن به‌وسیله ترازوی دقیق وزن شد، سپس به هکتار تعمیم داده شد. میزان درصد روغن با استفاده از دستگاه سوکسوله تعیین گردید. عملکرد روغن (کیلوگرم در هکتار) از حاصل‌ضرب درصد روغن در عملکرد دانه به دست آمد. برای تعیین میزان محتوای کلروفیل پیش از پایان فصل رشد، از برگ‌های گیاه نمونه‌برداری صورت پذیرفت. برای انجام این کار، ۰/۲ گرم از برگ تر با پنج سی‌سی استون ۸۰ درصد به‌خوبی ساییده و مخلوط گردید. محتوای هاون با عبور از صافی مجدداً به‌همراه ۱۰ سی‌سی دیگر استون مخلوط شد و به حجم ۱۵ سی‌سی رسانده شد. سه سی‌سی از محلول در کووت ریخته شد و میزان جذب آن در طول موج‌های ۶۶۳، ۶۴۶ و ۴۷۰ نانومتر به‌وسیله دستگاه اسپکروفتومتر در مقابل بلانک متانول خوانده شد.

معادله (۱)

Chlorophyll a = (19.3× A663 - 0.86 × A646)V /100W

معادله (۲)

Chlorophyll b = (19.3× A646 - 3.6 × A663)V /100W

Total chlorophyll = Chla + Chlb معادله (۳)

تجزیه واریانس و مقایسه میانگین داده‌ها در سطح احتمال پنج درصد و براساس آزمون (LSD)[1] با استفاده از نرم‌افزار SAS (v. 9.4) انجام گردید.

نتایج و بحث

ارتفاع بوته

تجزیه واریانس داده‌های مربوطه نشان داد که اثر سطوح بیوچار و کود شیمیایی بر ارتفاع بوته در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد، ولی اثر متقابل این دو بر این ویژگی معنی‌دار نبود (جدول ۲). نتایج اندازه‌گیری ارتفاع بوته کنجد در طول فصل رشد نشان داد که با افزودن بیوچار به خاک، ارتفاع گیاه نسبت به شاهد افزایش یافت. بیش‌ترین ارتفاع مربوط به تیمار مصرف ۸ درصد وزنی بیوچار با ۱۰۲/۵۷ سانتی‌متر و کم‌ترین ارتفاع مربوط به تیمار عدم مصرف بیوچار با ۹۱/۳۷ سانتی‌متر بود (جدول ۳). ارتفاع بوته در تمام سطوح بیوچار نسبت به شاهد به‌طور معنی‌داری افزایش یافت، هرچند تفاوت ارتفاع بوته بین چهار تیمار مصرف ۲، ۴، ۸ و ۱۰ درصد وزنی بیوچار غیرمعنی‌دار بود (جدول ۳). بررسی اثر سطوح کود بر ارتفاع بوته بیانگر تأثیر بیش‌تر این عامل بر این صفت می‌باشد. مصرف ۱۰۰ درصد کود شیمیایی، ارتفاع بوته را ۱۳/۰۸ سانتی‌متر نسبت به تیمار عدم استفاده از کود شیمیایی افزایش داد (جدول ۳). مقایسه میانگین اثر ارتفاع بوته تحت تأثیر کود شیمیایی نشان داد که بیش‌ترین و کم‌ترین ارتفاع بوته به‌ترتیب از تیمار مصرف ۱۰۰ درصد کود با ۱۰۵/۸۳ سانتی‌متر و تیمار عدم مصرف کود با ۹۲/۷۵ سانتی‌متر به دست آمد (جدول ۳).

ارتفاع بوته مانند هرکدام از صفات رویشی و زایشی به‌شدت تحت تأثیر عناصر غذایی قرار می‌گیرد. دسترسی گیاهان به مواد معدنی و آب کافی، به‌خصوص عنصر نیتروژن از طریق تأثیر بر تقسیم سلولی و بزرگ شدن آن‌ها در افزایش ارتفاع گیاه مؤثر است. عناصر نیتروژن و فسفر تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر ارتفاع گیاه دارند. بیوچار از طریق افزایش جذب عناصر غذایی، توانایی سیستم فتوسنتزی و به‌دنبال آن رشد بیش‌تر گیاه را فراهم می‌سازد (Khasheim et al., 2019). در تحقیقی مشاهده شد که پس از ۵۲ روز از کاشت ذرت (*Zea mays* L.)، مقدار ارتفاع بوته به‌طور متوسط در مواردی که بیوچار استفاده شده بود، بیشتر از عدم کاربرد بیوچار بود (Maria et al., 2019).

تعداد شاخه‌های جانبی

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها حاکی از این است که اثر سطوح بیوچار و کود شیمیایی بر تعداد شاخه‌های فرعی در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد، ولی اثر متقابل آن‌ها بر صفت مذکور تأثیر معنی‌داری نداشت (جدول ۲). افزایش مصرف بیوچار، تعداد شاخه‌های جانبی را افزایش داد. تعداد شاخه‌های جانبی در تیمار حاوی ۸ درصد وزنی بیوچار، در مقایسه با شاهد ۴۷/۰۸ درصد افزایش یافت (جدول ۳). بیش‌ترین تعداد شاخه جانبی مربوط به تیمار مصرف ۸ درصد وزنی بیوچار (۴/۰۳) و کم‌ترین تعداد شاخه جانبی مربوط به شاهد (۲/۷۴) بود (جدول ۳). به‌کار بردن کود شیمیایی در مقایسه با عدم کاربرد آن، تعداد شاخه‌های جانبی را افزایش داد (جدول ۳). مقایسه میانگین اثر کود شیمیایی بر این صفت نشان داد که بیش‌ترین تعداد شاخه فرعی در تیمار کاربرد ۱۰۰ درصد کود شیمیایی در هکتار با ۴/۲۶ مشاهده شد و کم‌ترین تعداد شاخه فرعی نیز ۲/۶۲ مربوط به تیمار عدم مصرف بود (جدول ۳).

به نظر می‌رسد که هر عاملی مانند وجود رطوبت و مواد غذایی مناسب که فرصت رشد بیش‌تری در اختیار گیاه قرار می‌دهد، موجب شکل‌گیری مکان‌های بالقوه کپسول بیش‌تری روی گیاه از طریق

1- Least Significant Difference Test

افزایش ارتفاع و انشعاب جانبی خواهد شد. این صفت ریخت‌شناختی همانند ارتفاع بوته تأثیر مثبتی بر عملکرد دانه دارد، زیرا با افزایش تعداد شاخه‌های فرعی و تعداد کپسول، به‌تبع عملکرد دانه نیز افزایش می‌یابد. طی تحقیقی گزارش شد که کاربرد بیوچار باعث افزایش تعداد شاخه فرعی در گیاه مرزه تابستانه (*Satureja hortensis* L.) گردید که با نتایج ما هم‌خوانی دارد (Mehdi Zadeh et al., 2018). استفاده از کودهای شیمیایی باعث افزایش ارتفاع بوته و تعداد شاخه های فرعی در بوته‌های سیاهدانه شد. این افزایش، تأثیر مثبت کودهای شیمیایی به‌ویژه کودهای نیتروژنی را بر رشد رویشی گیاهان نشان می‌دهد (Akom et al., 2015).

تعداد کپسول در بوته

با توجه به نتایج جدول ۲، اثرات اصلی و اثر متقابل بیوچار و کود شیمیایی بر صفت تعداد کپسول در بوته در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار گردید. بیش‌ترین تعداد کپسول در بوته با ۷۷/۴۴ عدد مربوط به تیمار ۸ درصد وزنی بیوچار و تیمار مصرف ۱۰۰ درصد کود شیمیایی به دست آمد. پس از این تیمار، بیش‌ترین تعداد کپسول در بوته با ۵۷/۸۸ عدد متعلق به تیمار کاربرد ۸ درصد وزنی بیوچار و تیمار مصرف کودی ۵۰ درصد بود. کم‌ترین تعداد کپسول در بوته نیز با ۱۶/۳۳ عدد در شاهد حاصل شد (شکل ۱). نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که کاربرد ترکیبی بیوچار و کود شیمیایی بیش‌ترین تأثیر را بر تعداد کپسول در بوته داشت. کاربرد هریک از آن‌ها نیز به‌تنهایی اثر افزایشی معنی‌داری را بر تعداد کپسول در بوته داشت. تعداد کپسول در بوته به‌خصوص در ارقام چند شاخه کنجد، تابعی از تعداد شاخه‌های فرعی است و همبستگی مثبت و معنی‌داری بین این دو صفت وجود داشت. مصرف عناصر غذایی نقش مؤثری بر فعل و انفعالات بیوشیمیایی، فتوسنتز، افزایش تعداد برگ، افزایش طول دوره رویش، تجمع ماده خشک اندام‌های هوایی و همچنین اجزای عملکرد مثل تعداد کپسول در بوته دارد (Sajjadi Nik et al., 2012).

راب و همکاران (Rab et al., 2016) بیان کردند که کاربرد بیوچار باعث افزایش تعداد غلاف در لوبیای بال‌دار (*Vigna radiate*) شد. آن‌ها افزایش تعداد غلاف در بوته را افزایش نسبت C به N و تأثیر آن در رشد زایشی گیاه عنوان کردند. چنانچه در بالا ذکر شد، تعداد کپسول در بوته از اجزای مهم عملکرد دانه در گیاه کنجد محسوب می‌شود. تأثیر کود نیتروژن به‌صورت اوره و همچنین کودهای زیستی بر تعداد کل کپسول کنجد با افزایش تعداد شاخه فرعی و همچنین بهبود رشد ریشه در آزمایش‌های مختلف معنی‌دار گزارش شده است (Shakeri et al., 2012).

تعداد دانه در کپسول

براساس نتایج به‌دست‌آمده از تجزیه واریانس داده‌ها، این صفت تحت تأثیر تیمارهای بیوچار و کود شیمیایی قرار گرفت و در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد (جدول ۲). براساس جدول مقایسه میانگین داده‌ها (جدول ۳)، بیش‌ترین تعداد دانه در کپسول که در تیمار ۱۰ درصد وزنی بیوچار (۷۰/۵۹) و کم‌ترین تعداد دانه در بوته در شاهد (۶۵/۷۷) مشاهده شد. در بین تیمارهای کودی، بیش‌ترین تعداد دانه در بوته مربوط به تیمار ۱۰۰ درصد نیاز کودی (۷۱/۲۸) و کم‌ترین آن مربوط به تیمار بدون کاربرد کود شیمیایی (۶۵/۲۴) بود. تعداد دانه در بوته، در حقیقت ظرفیت مخزن گیاه را تعیین می‌کند و هرچه تعداد دانه بیش‌تر باشد، گیاه دارای مخزن بزرگ‌تری برای دریافت مواد فتوسنتزی بوده و در نهایت افزایش این صفت منجر به افزایش عملکرد دانه خواهد شد (Rezaei Chianeh et al., 2015). در مطالعه تأثیر کاربرد بیوچار در کلزا (*Brassica napus* L.) تحت شرایط دیم، تعداد دانه در خورجین (۲۲ درصد) و عملکرد دانه کلزا (۴۶/۵۹ درصد) افزایش یافت (Tian et al., 2020).

وزن هزار دانه

نتایج نشان داد که اثرات اصلی بیوچار و کود شیمیایی بر وزن هزار دانه تأثیر معنی‌داری در سطح احتمال یک درصد داشت (جدول ۴). نتایج مقایسه میانگین‌ها نشان داد که بیش‌ترین میزان وزن هزار دانه مربوط به تیمار ۸ درصد وزنی بیوچار با ۲/۹۷ گرم و کم‌ترین مقدار این صفت مربوط به شاهد با ۲/۳۰ گرم بود (جدول ۵). بیش‌ترین وزن هزار دانه در تیمار کودی مصرف ۱۰۰ درصد به‌میزان ۲/۸۰ گرم و کم‌ترین مقدار آن در شاهد به‌مقدار ۲/۵۱ گرم مشاهده شد (جدول ۵). کاربرد بیوچار بر وزن دانه در بوته مؤثر بود. کاربرد بیوچار، ضمن تأمین بخشی از عناصر غذایی مورد نیاز گیاه، به‌دلیل دارا بودن سطح ویژه بالا، از طریق افزایش عرضه مواد غذایی منجر به بهبود وزن دانه در بوته گردید. در نتایجی مشابه با تحقیق حاضر، محققان گزارش دادند که افزودن بیوچار به خاک موجب افزایش وزن هزار دانه می‌گردد (Mahmoud Soltani & Abbasian, 2021).

عملکرد بیولوژیک

مطابق با جدول تجزیه واریانس داده‌ها، عملکرد بیولوژیک به‌طور معنی‌داری در سطح احتمال یک درصد تحت تأثیر اثر سطوح بیوچار و کود شیمیایی قرار گرفت (جدول ۴).

جدول ۲- تجزیه واریانس (میانگین مربعات) ارتفاع بوته، تعداد شاخه جانبی، تعداد کپسول در بوته و تعداد دانه در کپسول کنجد تحت تأثیر بیوچار و کود شیمیایی

Table 2- Analysis of variance (mean of squares) of plant height, number of branches per plant, number of capsules per plant and number of seeds per capsule of sesame under biochar and chemical fertilizer

منابع تغییر S.O.V	درجه آزادی df	ارتفاع بوته Plant height	تعداد شاخه در بوته Number of branches per plant	تعداد کپسول در بوته Number Capsule	تعداد دانه در کپسول Number of seeds in capsule
بلوک Block	2	8.34	0.017	26.47	0.48
بیوچار Biochar	4	186.05 **	2.61 **	909.94 **	27.44 **
کود Fertilizer	2	645.15**	10.77 **	3750.46 **	138.94 **
بیوچار × کود F × B	8	30.66 ns	0.606 ns	71.18 **	5.70 ns
خطا Error	28	32.93	0.347	4.32	7.05
ضریب تغییرات CV (%)	-	5.79	16.55	5.01	3.90

ns، ** و *: به‌ترتیب عدم تفاوت معنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال یک و پنج درصد

ns, ** and *: non significant, significant at 1 and 5% level of probability, respectively

جدول ۳- مقایسه میانگین ارتفاع بوته، تعداد شاخه جانبی و تعداد دانه در کپسول کنجد تحت تأثیر بیوچار و کود شیمیایی

Table 3- Mean comparison of plant height, number of branches per plant and number of seeds per capsule of sesame under biochar and chemical fertilizer

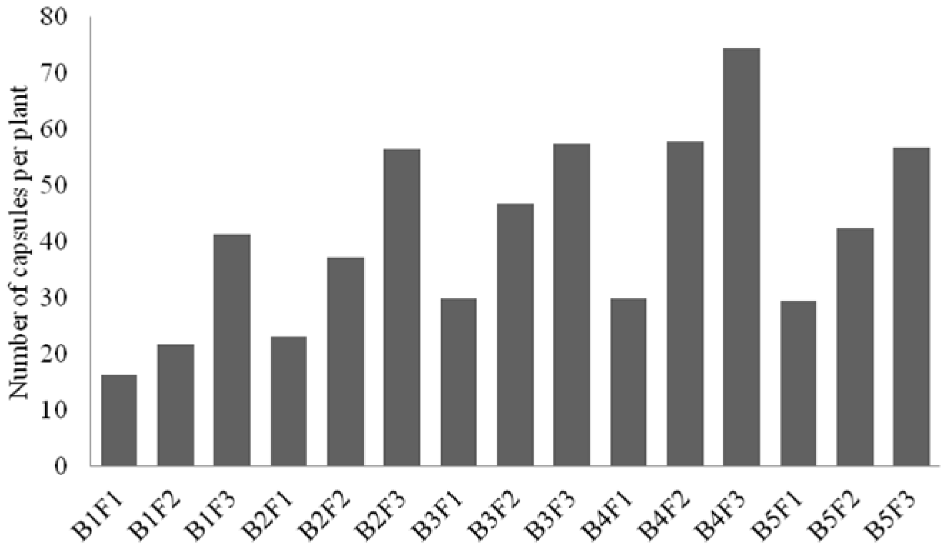
تیمار Treatment		ارتفاع بوته Plant height (cm)	تعداد شاخه در بوته Number of branches per plant	تعداد دانه در کپسول Number of seeds in capsule
سطوح بیوچار Biochar levels	B_0	91.37	2.74	65.77
	B_2	101.70	3.29	67.40
	B_4	101	3.85	68.07
	B_8	102.57	4.03	68.44
	B_{10}	98.37	3.88	70.59
	LSD 5%	5.54	0.53	2.56
سطوح کودی Frtilizer levels	F_0	92.75	2.62	65.24
	$F_{50\%}$	98.42	3.80	67.64
	$F_{100\%}$	105.83	4.26	71.28
	LSD 5%	4.29	0.44	1.98

B_0: شاهد (عدم مصرف بیوچار)، B_2: ۲ درصد وزنی بیوچار، B_4: ۴ درصد وزنی بیوچار، B_8: ۸ درصد وزنی بیوچار و B_{10}: ۱۰ درصد وزنی بیوچار

B_0: Control (no biochar application), B_2: 2% (w/w), B_4: 4% (w/w) biochar, B_8: 8% (w/w) biochar, and B_{10}: 10% (ww) biochar

F_0: شاهد (عدم مصرف کود شیمیایی)، $F_{50\%}$: ۵۰ درصد کود شیمیایی توصیه شده و $F_{100\%}$: ۱۰۰ درصد کود شیمیایی توصیه شده

, $F_{50\%}$: 50% Recommended chemical fertilizer, and $F_{100\%}$: 100% Recommended chemical fertilizer) F_0: Control (no chemical fertilizer



شکل ۱- اثر متقابل سطوح مختلف بیوچار و کود شیمیایی بر تعداد کپسول در بوته LSD (5%)= 2.007

Fig. 1- Interaction effect of different levels of biochar and chemical fertilizer on the number of capsules per plant

B_0: شاهد (عدم مصرف بیوچار)، B_2: ۲ درصد وزنی بیوچار، B_4: ۴ درصد وزنی بیوچار، B_8: ۸ درصد وزنی بیوچار و B_{10}: ۱۰ درصد وزنی بیوچار

B_0: Control (no biochar application), B_2: 2% (w/w), B_4: 4% (w/w) biochar, B_8: 8% (w/w) biochar, and B_{10}: 10% (ww) biochar

F_0: شاهد (عدم مصرف کود شیمیایی)، $F_{50\%}$: ۵۰ درصد کود شیمیایی توصیه شده و $F_{100\%}$: ۱۰۰ درصد کود شیمیایی توصیه شده

, $F_{50\%}$: 50% Recommended chemical fertilizer, and $F_{100\%}$: 100% Recommended chemical) F_0: Control (no chemical fertilizer

مقایسه میانگین‌های اثر تیمارهـای مـورد بررسـی نشـان داد کـه عملکرد بیولوژیک با افزایش سطوح بیوچار افزایش یافت، به‌طوری‌کـه بیش‌ترین و کم‌ترین مقدار عملکرد بیولوژیـک بـه‌ترتیب بـا میـانگین ۵۴۱۸/۳ و ۲۸۸۴/۵ کیلوگرم در هکتار مربوط به تیمار ۸ درصد وزنـی بیوچار و عدم مصرف بیوچار بود (جدول ۵). کاربرد سـطوح ۲، ۴، ۸ و ۱۰ درصد وزنی بیوچار نسبت به شاهد به‌ترتیب ۵۰/۹، ۵۶/۳، ۸۷/۸ و ۴۸/۷ درصد وزن عملکرد بیولوژیک را افزایش داد. بیش‌ترین عملکرد بیولـوژیکی در تیمـار کـودی مصـرف ۱۰۰ درصـد بـه‌میزان ۵۹۷۶/۳ کیلوگرم در هکتار و کم‌ترین عملکرد بیولوژیک در تیمار عـدم کـاربرد کود شیمیایی به‌مقدار ۲۹۱۵/۴ کیلوگرم در هکتار حاصل شـد (جـدول ۵). در پژوهشی مشخص شد که افزودن بیوچار سبب افزایش معنی‌دار وزن خشک اندام هوایی ذرت گردید، به‌طوری‌که کاربرد سـطح ۲ و ۴ درصد وزنی بیوچار نسبت به شاهد (عدم کاربرد بیوچار) به‌ترتیب ۱۶ و ۲۸ درصد وزن خشک اندام هوایی ذرت را افـزایش داد (Rahimi et al., 2018).

عملکرد دانه

براساس نتایج تجزیه واریانس، عملکرد دانه به‌طور معنـی‌داری در سطح احتمال یک درصـد تحـت تـأثیر اثـرات اصـلی بیوچـار و کـود شیمیایی قرار گرفت، امّا اثر متقابل بیوچار و کود بر این صفت معنی‌دار نبود (جدول ۴). مقایسه میانگین عملکرد دانه مؤید این اسـت کـه بـا مصرف ۸ درصد وزنی بیوچار، عملکرد دانـه بـه ۱۲۶۷/۴ کیلـوگرم در هکتار رسید، در حالی‌که عملکـرد دانـه در شـاهد ۴۵۲/۹ کیلـوگرم در هکتار بود (جدول ۵). مقایسه میانگین تیمارهای کودی نشان داد کـه بیش‌ترین عملکرد دانه مربـوط بـه تیمـار مصـرف ۱۰۰ درصـد کـود شیمیایی در هکتار (به‌میزان ۱۳۳۹/۸ کیلوگرم) و کم‌ترین عملکرد دانه مربوط به تیمار عدم مصرف کود (به‌میزان ۴۳۵/۴ کیلوگرم در هکتـار) بود (جدول ۵).

کودهای شیمیایی به‌ویژه نیتروژن با تأثیری که بر رشـد و توسـعه اندام‌هایی رویشی از طریق سنتز پروتئین‌ها، گسترش سطح برگ‌هـا و نیز دوام اندام‌های فتوسنتزکننده دارند، می‌توانند در افـزایش عملکـرد دانه در گیاهان روغنی نقش مؤثری داشته باشند. نتایج یـک پـژوهش

روی گیاه گلرنگ (*Carthamus tinctorius* L.) نشان داد که کاربرد بیوچار به‌میزان ۱۰ تن در هکتار منجر به عملکرد دانه (۲۲/۴ درصد) و روغن گیاه گلرنگ (۲۱/۶ درصد) شد (Sajedi & Sajedi, 2020). در پژوهش دیگری، محققان به افزایش عملکرد گندم در تیمارهای حاوی بیوچار اشاره کردند و دلیل این امر را نگهداری بهتر آب و عناصر غذایی توسط بیوچار و تغذیه بهتر گیاه عنوان کردند (Gebremedhin et al., 2015).

شاخص برداشت

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها بیانگر آن است که اثر بیوچار بر شاخص برداشت گیاه در سطح یک درصد معنی‌دار شد (جدول ۴). مقایسه میانگین‌ها نشان داد که بیش‌ترین شاخص برداشت مربوط به تیمار ۸ درصد وزنی مصرف بیوچار (۲۲/۰۳ درصد) و کم‌ترین شاخص برداشت مربوط به شاهد (۱۴/۰۹ درصد) بود (جدول ۵). اثر کود شیمیایی نیز اثر معنی‌داری در سطح یک درصد بر صفت مذکور داشت. بیش‌ترین شاخص برداشت در تیمار کودی مصرف ۱۰۰ درصد به‌میزان ۲۲/۰۴ و کم‌ترین شاخص برداشت در شاهد به مقدار ۱۴/۶۶ به دست آمد (جدول ۵).

راب و همکاران (Rab et al., 2016) افزایش شاخص برداشت را با افزایش مقادیر بیوچار گزارش کردند. در این آزمایش، افزایش عملکرد بیولوژیک با کاربرد کود شیمیایی مشاهده شد که این امر می‌تواند علت پایین بودن شاخص برداشت در تیمارهای مصرف کودی باشد. شاخص برداشت از تقسیم عملکرد دانه به عملکرد بیولوژیک به دست می‌آید. این مؤلفه‌ها، هرکدام تعیین‌کننده دیگری هستند. شاخص برداشت رابطه مستقیمی با عملکرد دانه و رابطه معکوس با عملکرد بیولوژیک دارد. کاهش عملکرد بیولوژیک مربوط به کاهش عملکرد دانه و عملکرد کاه‌وکلش است. همان‌طور که نتایج نشان داد، در تیماری که بیش‌ترین میزان عملکرد دانه حاصل شد، بیش ترین میزان شاخص برداشت نیز به دست آمد (جدول ۵).

نتایج نشان داد که کاربرد بیوچار و کود از طریق افزایش ارتفاع گیاه، تعداد شاخه‌های فرعی، تعداد کپسول، تعداد بذر در کپسول و تسریع نمو منجر به افزایش عملکرد دانه، کاه‌وکلش کنجد و در نهایت افزایش شاخص برداشت گردید. تیمارهایی که موجب افزایش میزان رشد رویشی مانند ارتفاع بوته شدند، ضمن بهبود اجزای عملکرد دانه، سهم دانه از زیست‌توده (شاخص برداشت) را ارتقاء بخشیدند و عملکرد دانه و شاخص برداشت را افزایش دادند. بررسی‌های انجام‌شده توسط سایر محققان نیز نشان می‌دهد که کاربرد بیوچار و ورمی‌کمپوست، شاخص برداشت را در گیاهان به‌واسطه افزایش میزان رشد و عملکرد دانه افزایش داد. در بررسی دیگری نیز افزایش شاخص برداشت کلزا با کاربرد بیوچار به دست آمد (Imran & Khan, 2015).

جدول ٤- تجزیه واریانس (میانگین مربعات) وزن هزار دانه، عملکرد بیولوژیک، عملکرد دانه و شاخص برداشت کنجد تحت تأثیر بیوچار و کود شیمیایی

Table 4- Analysis of variance (mean of squares) of 1000-seed weight, biological yield, seed yield and harvest index of sesame under biochar and chemical fertilizer

منابع تغییر S.O.V	درجه آزادی df	وزن هزار دانه 1000-seed weight	عملکرد بیولوژیک Biological yield	عملکرد دانه Seed yield	شاخص برداشت Harvest index
بلوک Block	2	0.0067	576991.38	54459.12	78.05
بیوچار Biochar	4	0.619**	7425439.55**	761837.23**	63.52 **
کود Fertilizer	2	0.329**	36211783.92**	3080584.71**	221.75 **
بیوچار × کود F × B	8	0.0029 ns	540536.83 ns	85889.80 ns	9.04 ns
خطا Error	28	0.0032	404687.8	41663.43	14.04
ضریب تغییرات CV (%)	-	2.14	14.82	23.44	19.74

ns، ** و *: به‌ترتیب عدم تفاوت معنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال یک و پنج درصد

ns, ** and *: non significant, significant at 1 and 5% level of probability, respectively

جدول ۵- مقایسه میانگین وزن هزار دانه، عملکرد بیولوژیک، عملکرد دانه و شاخص برداشت کنجد تحت تأثیر بیوچار و کود شیمیایی
Table 5- Mean comparison of 1000-seed weight, biological yield, seed yield and harvest index of sesame under biochar and chemical fertilizer

تیمار Treatment		وزن هزار دانه 1000-seed weight (g)	عملکرد بیولوژیک Biological yield ($kg.ha^{-1}$)	عملکرد دانه Seed yield ($kg.ha^{-1}$)	شاخص برداشت Harvest index (%)
سطوح بیوچار Biochar levels	B_0	2.30	2884.5	452.96	14.90
	B_2	2.52	4353.5	814.43	18.18
	B_4	2.84	4508.5	926.61	19.87
	B_8	2.97	5418.3	1267.40	22.03
	B_{10}	2.70	4290.3	891.30	19.88
	LSD 5%	0.055	614.29	197.1	3.61
سطوح کودی Frtilizer levels	F_0	2.51	2915.4	435.40	14.66
	$F_{50\%}$	2.69	3981.4	836.39	20.22
	$F_{100\%}$	2.80	5976.3	1339.83	22.04
	LSD 5%	0.042	475.82	152.67	2.80

B_0: شاهد (عدم مصرف بیوچار)، B_2: ۲ درصد وزنی بیوچار، B_4: ۴ درصد وزنی بیوچار، B_8: ۸ درصد وزنی بیوچار و B_{10}: ۱۰ درصد وزنی بیوچار

B_0: Control (no biochar application), B_2: 2% (w/w), B_4: 4% (w/w) biochar, B_8: 8% (w/w) biochar, and B_{10}: 10% (ww) biochar

F_0: شاهد (عدم مصرف کود شیمیایی)، $F_{50\%}$: ۵۰ درصد کود شیمیایی توصیه شده و $F_{100\%}$: ۱۰۰ درصد کود شیمیایی توصیه شده

, $F_{50\%}$: 50% Recommended chemical fertilizer, and $F_{100\%}$: 100% Recommended chemical fertilizer) F_0: Control (no chemical fertilizer

درصد روغن

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر اصلی بیوچار و کود شیمیایی بر درصد روغن کنجد معنی‌دار بود، درحالی‌که اثر متقابل بیوچار و کود شیمیایی معنی‌دار نشد (جدول ۶). این موضوع نشان می‌دهد که تغییرات درصد روغن تحت تأثیر سطوح بیوچار، مستقل از اثر کود شیمیایی بوده است. بررسی میانگین‌ها نشان داد که بیش‌ترین درصد روغن در شاهد بیوچار به‌میزان ۵۲/۸۲ درصد به دست آمد و با افزایش سطوح بیوچار، درصد روغن کاهش یافت؛ به‌طوری‌که کم‌ترین درصد روغن در تیمارهای ۴ و ۸ درصد وزنی بیوچار (به‌ترتیب ۴۹/۹۱ و ۴۹/۵۱ درصد) مشاهده شد (جدول ۷). در تیمار ۱۰ درصد وزنی بیوچار مقدار درصد روغن کمی افزایش یافت (۵۰/۹۲ درصد) که نشان‌دهنده الگوی غیرخطی در واکنش گیاه به افزایش بیوچار است. در مورد کود شیمیایی نیز روند مشابهی مشاهده شد. بیش‌ترین درصد روغن در تیمار بدون مصرف کود به‌میزان ۵۱/۳۲ درصد و کم‌ترین مقدار در تیمارهای کودی ۵۰ و ۱۰۰ درصد نیاز کودی حاصل گردید. بنابراین افزایش کود باعث کاهش تدریجی درصد روغن شد.

کاهش درصد روغن با افزایش سطوح بیوچار، به‌ویژه در تیمارهای ۴ و ۸ درصد وزنی بیوچار، می‌تواند ناشی از پدیده تثبیت موقت نیتروژن در خاک باشد. مطالعات جهانی در مورد آفتابگردان (*Helianthus annuus* L.)، کلزا و کنجد نیز نشان داده‌اند که بیوچار در برخی موارد موجب کاهش درصد روغن می‌شود، زیرا رشد رویشی را افزایش و تجمع چربی در دانه را کاهش می‌دهد (Yeboah et al., 2016). کاهش درصد روغن در اثر مصرف کود شیمیایی، به‌ویژه کود نیتروژن، کاملاً شناخته‌شده و در پژوهش‌های مختلف گزارش شده است. نیتروژن بالا باعث افزایش سنتز پروتئین و رشد رویشی می‌شود، درحالی‌که دسترسی کربن برای مسیرهای سنتز لیپید کاهش می‌یابد. این پدیده در کنجد، کلزا، بادام‌زمینی (*Arachis hypogaea* L.) و آفتابگردان نیز گزارش شده است (Hossain et al., 2020).

عملکرد روغن

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر بیوچار و کود شیمیایی بر عملکرد روغن بسیار معنی‌دار بود، امّا اثر متقابل آن‌ها معنی‌دار نشد (**جدول ٦**). مطابق جدول مقایسه میانگین‌ها، کاربرد بیوچار باعث افزایش چشمگیر عملکرد روغن نسبت به شاهد شد. بیش‌ترین عملکرد روغن مربوط به تیمار ۸ درصد وزنی بیوچار به‌میزان ۶۲۵/۲۲ کیلوگرم در هکتار و کم‌ترین مقدار مربوط به شاهد با ۲۳۹/۳۹ کیلوگرم در هکتار بود (جدول ۷) که نشان‌دهنده افزایش بیش از ۲/۵ برابر عملکرد روغن در اثر بیوچار است. در کود شیمیایی نیز تیمار ۱۰۰ درصد کودی بالاترین عملکرد روغن (۶۷۳/۳۳ کیلوگرم) را نشان داد که نسبت به شاهد (۲۲۲/۴۵ کیلوگرم)، افزایش سه برابری نشان داد (جدول ۷). با وجود معنی‌دار نبودن اثر متقابل، روند اعداد نشان می‌دهد که بیش‌ترین مقادیر عملکرد روغن در تیمارهای حاوی

سطوح بالای بیوچار همراه با کود شیمیایی مشاهده شد و این بیانگر اثر تجمعی و تقویتی دو نهاده در بهبود تغذیه گیاه و افزایش سنتز و ذخیره روغن است. مطالعات مختلف در آفتابگردان، سویا و کلزا نیز نشان داده‌اند که بیوچار می‌تواند عملکرد روغن را بین ۴۰ تا ۷۰ درصد افزایش دهد (El-Sherif et al., 2021). اگرچه درصد روغن با افزایش کود کاهش یافت، امّا عملکرد روغن به‌دلیل افزایش عملکرد دانه به‌شدت افزایش پیدا کرد که این موضوع در سایر مطالعات نیز گزارش شده است (Ghosh et al., 2019).

کلروفیل a

نتایج نشان داد که اثر اصلی بیوچار و کود شیمیایی بر کلروفیل تأثیر معنی‌داری در سطح احتمال یک درصد داشت، ولی اثر متقابل بین بیوچار و کود شیمیایی معنی‌دار نشد (جدول ۶). نتایج مقایسه میانگین‌ها نشان داد که بیش‌ترین میزان کلروفیل مربوط به تیمار ۸ درصد وزنی مصرف بیوچار (۱/۶۲ میلی‌گرم بر گرم وزن‌تر) و کم‌ترین مقدار این صفت مربوط به شاهد (۱/۲۰ میلی‌گرم بر گرم وزن‌تر) بود (جدول ۷). هرچه گیاه دارای سطح برگ بیش‌تری باشد، از انرژی خورشیدی بیش‌تری استفاده می‌کند و فتوسنتز بیش‌تری انجام می‌دهد. می‌توان به زبان ساده بیان کرد که افزایش فتوسنتز، رشد و عملکرد گیاه را بالا می‌برد. وجود شرایط مساعد رشدی برای یک گیاه، دوره رشد گیاه را طولانی‌تر می‌کند و بالعکس.

بیوچار، مقدار کلروفیل a و b را عمدتاً به‌دلیل بهبود جذب منیزیم و نیتروژن به‌عنوان درشت مغذی‌های ضروری برای بیوسنتز کلروفیل افزایش می‌دهد (Zargar Shooshtari et al., 2020). با افزایش حاصل‌خیزی خاک، گیاهان قادر به رشد بهتر و در نتیجه افزایش عملکرد هستند. این شرایط ملزم به این است که گیاه بتواند فتوسنتز بالاتری داشته باشد که در نتیجه ورود بیش‌تر نور به تاج‌پوشش و افزایش شاخص سطح برگ، این امکان تا حدی فراهم می‌شود. همچنین در پژوهشی عنوان شد که در شرایط آب کافی و کاربرد بیوچار در خاک، افزایش میزان کلروفیل، فتوسنتز و هدایت روزنه‌ای در ذرت مشاهده شد (Maria et al., 2019).

کلروفیل b

همان‌طور که در جدول ۶ مشاهده می‌گردد، اثرات اصلی بیوچار و کود شیمیایی بر صفت کلروفیل در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود، ولی اثر متقابل بین آن‌ها معنی‌دار نشد. مقایسه میانگین بیوچار نشان داد که بیش‌ترین مقدار کلروفیل b در ترکیب ۴ درصد وزنی بیوچار (۱/۱۵ میلی‌گرم بر گرم وزن‌تر) و کم‌ترین مقدار در شاهد (۰/۸۴ میلی‌گرم بر گرم وزن‌تر) مشاهده شد (جدول ۷). مقایسه میانگین تیمار کود شیمیایی حاکی از آن است که بیش‌ترین مقدار کلروفیل b با ۱/۱۱ میلی‌گرم بر گرم وزن‌تر از تیمار مصرف ۱۰۰ درصد و کم‌ترین مقدار کلروفیل با ۰/۸۶ میلی‌گرم بر گرم وزن‌تر از شاهد به دست آمد (جدول ۷). در مورد محتوای کلروفیل b، کاربرد بیوچار موجب افزایش مقدار این صفت شد. نتایج یک تحقیق روی گیاه خربزه (*Cucumis melo* L.) نشان داد که کاربرد بیوچار خرما باعث افزایش رشد و کلروفیل a و b گردید (Bagheri et al., 2020).

کلروفیل کل

تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که کلروفیل کل به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر اثرات اصلی بیوچار و کود شیمیایی قرار گرفت (جدول ۶). بررسی جدول ۷ نشان داد که بیش‌ترین کلروفیل کل از تیمار ۴ درصد وزنی بیوچار با ۲/۷۵ میلی‌گرم بر گرم وزن‌تر و کم‌ترین آن با میزان ۲/۰۴ میلی‌گرم بر گرم وزن‌تر از شاهد حاصل شد (جدول ۷). بیش‌ترین کلروفیل کل مربوط به تیمار مصرف ۱۰۰ درصد نیاز کودی با ۲/۶۸ میلی‌گرم بر گرم وزن‌تر و کم‌ترین کلروفیل کل مربوط به شاهد با ۲/۱۸ میلی‌گرم بر گرم وزن‌تر بود (جدول ۷). بیوچار با افزایش فراهمی و جذب منیزیم موجب افزایش محتوای کلروفیل در گیاه می‌شود (Abeer et al., 2015). زمانی که شرایط رشدی گیاه بهبود می‌یابد، رشد و عملکرد نهایی گیاه در اثر افزایش شاخص‌های فیزیولوژیک از جمله محتوای کلروفیل گیاه افزایش می‌یابد. در مطالعه‌ای با مقایسه تأثیر کودهای بیولوژیک و بیوچار بر صفات فیزیولوژیک لوبیا چشم بلبلی (*Vigna unguiculata* L.) نتایج حاکی از آن بود که مصرف بیوچار سبب افزایش ۱۵ درصدی کلروفیل کل نسبت به شاهد گردید (Yaghoby et al., 2014).

جدول ٦- تجزیه واریانس (میانگین مربعات) درصد روغن، عملکرد روغن، کلروفیل a، کلروفیل b و کلروفیل کل کنجد تحت تأثیر بیوچار و کود شیمیایی

Table 6- Analysis of variance (mean of squares) of oil percentage, oil yield, Chlorophyll a, Chlorophyll b and Total Chlorophyll of sesame under biochar and chemical fertilizer

منابع تغییر S.O.V	درجه آزادی df	درصد روغن Oil percentage	عملکرد روغن Oil yield	کلروفیل a Chlorophyll a	کلروفیل b Chlorophyll b	کلروفیل کل Total chlorophyll
بلوک Block	2	0.322	15239.10	0.0013	0.0005	0.0035
بیوچار Biochar	4	15.95 **	169931.18 **	0.307 **	0.155 **	0.854 **
کود Fertilizer	2	1.70 **	765483.29 **	0.258 **	0.234**	0.964 **
بیوچار × کود F × B	8	0.399 ns	18988.43 ns	0.028 ns	0.0008 ns	0.026 ns
خطا Error	28	0.227	1059.75	0.017	0.0005	0.019
ضریب تغییرات CV (%)	-	0.93	23.41	9.01	2.46	5.71

ns، ** و *: به‌ترتیب عدم تفاوت معنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال یک و پنج درصد

ns, ** and *: non significant, significant at 1 and 5% level of probability, respectively

جدول ۷- مقایسه میانگین درصد روغن، عملکرد روغن، کلروفیل a، کلروفیل b و کلروفیل کل کنجد تحت تأثیر بیوچار و کود شیمیایی

Table 7- Mean comparison of oil percentage, oil yield, chlorophyll a, chlorophyll b and total chlorophyll of sesame under biochar and chemical fertilizer

تیمار Treatment		درصد روغن Oil percent (%)	عملکرد روغن Oil yield ($kg.ha^{-1}$)	کلروفیل a Chlorophyll a ($mg.g^{-1}$ FW)	کلروفیل b Chlorophyll b ($mg.g^{-1}$ FW)	کلروفیل کل Total Chlorophyll ($mg.g^{-1}$ FW)
سطوح بیوچار Biochar levels	B_0	52.82	239.39	1.20	0.84	2.04
	B_2	51.61	420.05	1.34	0.86	2.20
	B_4	49.91	460.21	1.60	1.15	2.75
	B_8	49.51	625.22	1.62	1.07	2.69
	B_{10}	50.92	452.93	1.54	0.97	2.51
	LSD 5%	0.46	99.38	0.12	0.023	0.13
سطوح کودی Frtilizer levels	F_0	51.32	222.45	1.32	0.86	2.18
	$F_{50\%}$	50.90	422.91	1.49	0.96	2.46
	$F_{100\%}$	50.65	673.336	1.57	1.11	2.68
	LSD 5%	0.356	38.49	0.098	0.018	0.104

B_0: شاهد (عدم مصرف بیوچار)، B_2: ۲ درصد وزنی بیوچار، B_4: ۴ درصد وزنی بیوچار، B_8: ۸ درصد وزنی بیوچار و B_{10}: ۱۰ درصد وزنی بیوچار

B_0: Control (no biochar application), B_2: 2% (w/w), B_4: 4% (w/w) biochar, B_8: 8% (w/w) biochar, and B_{10}: 10% (ww) biochar

F_0: شاهد (عدم مصرف کود شیمیایی)، $F_{50\%}$: ۵۰ درصد کود شیمیایی توصیه شده و $F_{100\%}$: ۱۰۰ درصد کود شیمیایی توصیه شده

, $F_{50\%}$: 50% Recommended chemical fertilizer, and $F_{100\%}$: 100% Recommended chemical fertilizer) F_0: Control (no chemical fertilizer

نتیجه‌گیری

در این آزمایش، تأثیر مثبت معنی‌دار کاربرد بیوچار و کود شیمیایی بر رشد و عملکرد گیاه کنجد مشاهده گردید. نتایج تحقیق حاضر حاکی از آن است که کاربرد بیوچار بر ارتفاع بوته، تعداد شاخه‌های جانبی، تعداد کپسول در بوته، تعداد دانه در کپسول، وزن هزار دانه، عملکرد دانه، عملکرد بیولوژیک، شاخص برداشت، عملکرد روغن، کلروفیل a، کلروفیل b و کلروفیل کل اثر معنی‌دار و مثبتی داشت. کاربرد کود شیمیایی نیز بر کلیه صفات اثر معنی‌داری و مثبتی داشت. اثر متقابل کاربرد بیوچار و کود شیمیایی بر تعداد کپسول در بوته معنی‌دار شد. به‌کار بردن بیوچار علاوه‌بر تأثیر بهینه بر عملکرد،

می‌تواند راه‌حلی مفید و اقتصادی در جهت صرفه‌جویی مصرف کود و هزینه‌های ناشی از آن، منجر به کاهش اثرات مخرب زیست محیطی شد. با توجه به اینکه بیش‌ترین عملکرد دانه در بـالاترین سـطح کـود شیمیایی استفاده‌شده به دست آمد و همچنین نتایج آزمایش یک‌سـاله قابل اعتماد نیست، لذا پژوهش‌های تکمیلی برای تعیین بهترین سطح کودی توصیه می‌شود.

References

1. Abbas, T., Rizwan, M., Ali, S., Rehman, M.Z., Qayyum, M.F., Abbas, F., Hannan, F., Rinklebe, J., & Ok, Y.S. (2017). Effect of biochar on cadmium bioavailability and uptake in wheat (*Triticum aestivum* L.) grown in a soil with aged contamination. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, *140*, 37-47. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.02.028
2. Abbaspour, F., Asghari, H.R., Rezvani Moghaddam, P., Abbasdokht, H., Shabahang, J., & Baig Babaei, A. (2017). Effect of biochar application on yield and yield components of black seed (*Nigella sativa* L.) under low irrigation condition. *Iranian Journal of Medicinal and Aromatic Plants*, *33*(5), 837-852. (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.22092/ijmapr.2017.114596.2075
3. Abd El-Mageed, T.A., Belal, E.E., Rady, M.O.A., Abd El-Mageed, S.A., Mansour, E., Awad, M.F., & Semida, W.M. (2021). Acidified biochar as a soil amendment to drought stressed (*Vicia faba* L.) plants: Influences on growth and productivity, nutrient status, and water use efficiency. *Agronomy*, *11(7)*, 2-18. https://doi.org/10.3390/agronomy11071290
4. Abeer, H., Abd-Allah, E.F., Alqarawi, A.A., & Egamberdieva, D. (2015). Induction of salt stress tolerance in cowpea [*Vigna unguiculata* (L.) Walp.] by arbuscular mycorrhizal fungi. *Legume- Research-An International Journal*, *38*(5), 579-588. https://doi.org/10.18805/lr.v38i5.5933
5. Ahmed, J., Qadir, G., Ansar, M., Wattoo, F.M., Javed, T., Ali, B., & Rahimi, M. (2023). Shattering and yield expression of sesame (*Sesamum indicum* L.) genotypes influenced by paclobutrazol concentration under rainfed conditions of Pothwar. *BMC Plant Biology*, *23*, 1-13. https://doi.org/10.1186/s12870-023-04145-7
6. Akom, M., Boateng, C.H.O., Otoo1, E., & Dawoe, E. (2015). Effect of biochar and inorganic fertilizer in yam (*Dioscorea rotundata* Poir) production in a forest agroecological zone. *Journal of Agricultural Science*, *7(3)*, 211-222. http://dx.doi.org/10.5539/jas.v7n3p211
7. Amna, B.A., Azeem, M.A., Qayyum, A., Mustafa, G., Ahmad, M.A., & Chaudhary, H.J. (2022). Biofabricated silver nanoparticles: A sustainable approach for augmentation of plant growth and pathogen control. In: Faizan, M. (Ed). Sustainable Agriculture Reviews 53. *Springer International Publishing*, *1*, 345-371. https://doi.org/10.1007/978-3-030-86876-5_14
8. Anonymous. (2023). Statistics of Agricultural Crops, 2023-2024. Ministry of Agriculture Jahad, Tehran, Iran. (In Persian)
9. Bagheri, S., Hassandokht, M.R., Mirsoleimani, A., & Mousavi, A. (2020). Effects of palm leaf biochar on the availability of soil nutrients, leaf nutrient concentration, and physiological characteristics of melon plants (*Cucumis melo* L.) under drought stress. *Acta Agrobotanica*, *73*(1), 1-12. https://doi.org/10.5586/aa.7311
10. Chaudhry, U.K., Shahzad, S., Naqqash, M.N., Saboor, A., Yaqoob, S., Abbas, M.S., & Saeed, F. (2016). Integration of biochar and chemical fertilizer to enhance quality of soil and wheat crop (*Triticum aestivum* L.). *Journal of Biodiversity and Environmental Sciences*, *9*(1), 348-358. https://doi.org/10.7287/peerj.preprints.1631v1
11. Daneshmandi, M.S., & Seyyedi, S.M. (2019). Nutrient availability and saffron corms growth affected by composted pistachio residues and commercial poultry manure in a calcareous soil. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, *50*(12), 1–11. https://doi.org/10.1080/00103624.2019.1626871
12. El-Sherif, A., Abd El-Aty, A.M., & El-Shafie, A.F. (2021). Response of sunflower yield and oil quality to biochar and compost under deficit irrigation. *Agricultural Water Management*, *243*, 106483.
13. FAO. (2023). FAOSTAT (Food and Agriculture Organisation Statistical Databases). https://www.fao.org.
14. Gavili, E., Mousavi, S.A.A., & Kamgar Haghighi, A.A. (2016). Effect of cattle manure biochar and drought stress on the growth characteristics and water use efficiency of spinach under greenhouse conditions. *Iranian Journal of Water Research in Agriculture*, *30*(2), 243-259. (In Persian with English abstract). http://dx.doi.org/10.22092/jwra.2016.106647

15. Gebremedhin, G.H., Haileselassie, B., Berhe, D., & Belay, T. (2015). Effect of biochar on yield and yield components of wheat and post-harvest soil properties in Tigray, Ethiopia. *Journal of Fertilizers and Pesticides*, *6*, 158-162. https://doi.org/10.4172/2471-2728.1000158
16. Ghosh, A., Mandal, M., & Mandal, S. (2019). Impact of nitrogen fertilization on seed yield and oil profile of sesame (*Sesamum indicum* L.). *Industrial Crops and Products*, *128*, 85–92.
17. Haghanian, S., Yadavi, A., Balouch, H., & Moradi, A. (2016). Grain, oil yield and nitrogen use efficiency in different varieties of sesame (*Sesamum indicum* L.) under nitrogen fertilizer and weed competition. *Journal of Sustainable Agriculture and Production Science*, *26*(1), 67-81. (In Persian with English abstract)
18. Hossain, M.B., Hasan, M.R., & Rahman, M.M. (2020). Nitrogen and phosphorus effect on the growth, yield and oil content of sesame. *Journal of Agricultural Science*, *12*(5), 100–110.
19. Imran, G., & Khan, A. (2015). Biochar application and shoot cutting duration (days) influenced growth, yield and yield contributing parameters of *Brassica napus* L. *Journal of Biology, Agriculture and Healthcare*, 5(5), 1-6.
20. Khashei, A., Shahidi, A., Yaghoobzadeh, M., & Dastourani, M. (2019). Effect of biochar application and water tension levels on yield and yield components of medicinal plant (*Trachyspermum ammi*). *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, 13(2), 319-328. (In Persian with English abstract)
21. Mahmoud Soltani, S., & Abbasian, A. (2021). Simultaneous application effect of rice husk biochar and zinc sulfate fertilizer on yield, yield components of rice (*Oryza sativa* L.) Hashemi cultivar and some soil chemical properties. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, *52*(3), 707-719. (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.22059/IJSWR.2021.315776.668843
22. Maria, M.C.T., Liovando, M.C., Hugo, A.H., Raphael, B.A.F., Paulo, R.C., Jose Domingos, P.J., & Jose Maria, R.L. (2019). Soil water retention, physiological characteristics, and growth of maize plants in response to biochar application to soil. *Soil & Tillage Research*, *192*, 164–173. https://doi.org/10.1016/j.still.2019.05.007
23. Mehdi Zadeh, L., Moghadam, M., & Lakzian, A. (2018). The effect of biochar on growth characteristics and potassium to sodium ratio of summer savoury (*Satureja hortensis* L.) under sodium chloride stress. *Environmental Stresses in Agricultural Sciences*, *12*(2), 595-606. (In Persian with English abstract).
24. Ndor, E., Jayeoba, O., & Asadu, C. (2015). Effect of biochar soil amendment on soil properties and yield of sesame varieties in Lafia, Nigeria. American Journal of *Experimental* Agriculture, *9*, 1-8. https://doi.org/10.9734/AJEA/2015/19637
25. Palansooriya, K.N., Ok, Y.S., Awad, Y.M., Lee, S.S., Sung, J.K., Koutsospyros, A., & Moon, D.H. (2019). Impacts of biochar application on upland agriculture: A review. *Journal of Environmental Management*, *234*, 52-64. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.12.085
26. Pandit, N.R., Mulder, J., Hale, S.E., Martinsen, V., Schmidt, H.P., & Cornelissen, G. (2018). Biochar improves maize growth by alleviation of nutrient stress in a moderately acidic low-input Nepalese soil. *Science of the Total Environment*, *625*, 1380-1389. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.01.022
27. Rab, A., Rabnawaz Khan, M., Ul Haq, S., Zahid, S., Asim, M., Afridi, M.Z., Arif, M., & Munsif, F. (2016). Impact of biochar on mungbean yield and yield components. *Pure and Applied Biology*, *5*(3), 632-640. http://doi.org/10.19045/bspab.2016.50082
28. Rahimi, A., Abbaspour, D., Asghari, H.R., & Ghorbani, H. (2018). Surface adsorption kinetics of some pollutant elements by two biochars of rice bran and gentian leaves. MSc. Thesis, Faculty of Agriculture, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran.
29. Rezaei Chianeh, A., Tajbakhsh, M., Ghiyasi, M., & Amirnia, R. (2015). Effect of integrated organic and chemical fertilizers on quantitative and qualitative yield of chickpea (*Cicer arietinum* L.) under dry farming coditions. *Journal of Research in Crop Plants*, 3(1), 55-69. (In Persian with English abstract)
30. Rizwan, M., Ali, S., Qayyum, M.F., Ibrahim, M., Zia-ur-Rehman, M., Abbas, T., & Ok, Y.S. (2016). Mechanisms of biochar-mediated alleviation of toxicity of trace elements in plants: A critical review. *Environmental Science and Pollution Research*, *23*(3), 2230-2248. https://doi 10.1007/s11356-015-5697-7
31. Sajedi, A., & Sajedi, N.A. (2019). The effect of biochar application, priming and foliar spraying with water and salicylic acid on the yield and physiological traits of safflower under dryland conditions. *Environmental Stresses in Agricultural Sciences*, 13(1), 155-169. (In Persian with English abstract).
32. Sajjadi Nik, R., Yadavi, A., Baluchi, H.R., & Faraji, E. (2012). Comparison of the effects of chemical (urea), organic (vermicompost) and biological (nitroxine) fertilizers on the quantitative and qualitative yield of sesame.

(*Sesamum indicum* L.) *Journal of Agricultural Knowledge and Sustainable Production*, *21*(2), 87-101. (In Persian with English abstract).

33. Shakeri, E., Amini Dehaghi, M., Tabatabaei, S.A., & Modares Sanavi, S.A.M. (2012). Effect of chemical fertilizer and biofertilizer on seed yield, its components, oil and protein percent in sesame varieties. *Journal of Agricultural Knowledge and Sustainable Production*, *22*(1), 71-85. (In Persian with English abstract).
34. Tian, X., Li, Z., Wang, L., Wang, Y., & Li, B. (2020). Biochar and slow release urea effects on root morphology, grain yield, nitrogen uptake and utilization in *Brassica napus*. *International Journal of Agriculture and Biology*, 23(3), 653-660. https://doi 10.17957/IJAB/15.1335
35. Yaghoby, M., Amerian, M., & Asghar, H. (2014). Comparison of the effect of biological and biofertilized fertilizers on some physiological traits in bean growing. The 2nd National Conference of the Desert with the Approach of the Management of Arid and Desert Areas. Semnan University, Semnan, Iran. (in Persian)
36. Yeboah, E., Asamoah, G., Ofori, P., & Frimpong, K.A. (2016). Effect of biochar type and rate of application on soil fertility and yield of maize. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, *47*(5), 695–705.
37. Zareei Siahbidi, A., & Rezaizad, A. (2015). Technical instructions, planting and harvesting of canola in Kermanshah. Kermanshah Agricultural and Natural Resources Research and Education Center. https://agrilib.areeo.ac.ir/book_3863. (In Persian)
38. Zargar Shooshtari, F., Souri, M.K., Hasandokht, M.R., & Jari, S.K. (2020). Glycine mitigates fertilizer requirements of agricultural crops: Case study with cucumber as a high fertilizer demanding crop. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 7(19), 1-10. https://doi.org/10.1186/s40538-020-00185-5